Vol.13, No.1, Spring 2024, pp.151-172 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2022.75548.1186 Open access

Investigating the Earthquake Cloud Precursor in the 2017 Azgeleh Earthquake in Kermanshah, Iran

Mostafa Heidari[a*], Ahmad Mazidi[b], Iman Rousta[b]

[a] *MA in Remote Sensing, Yazd University, Yazd, Iran*
[b] *Associate Professor in Climatology, Yazd University, Yazd, Iran*

Received: 28 April 2022 ***Revised: 27 June 2022*** ***Accepted: 23 July 2022***

Abstract

The earthquake cloud is an ancient and visual precursor of an earthquake that sometimes is formed several days before the event, above the earthquake fault and often close to the epicenter. The most important characteristic of an earthquake cloud is that it emanates from the ground and remains in the sky for hours. This study aimed to find the major 2017 Azgeleh earthquake cloud by visual interpretation of Meteosat-8 satellite images. The characteristics of the cloud in question were then investigated using the same satellite products. By searching the infrared images, the Azgeleh earthquake cloud was found. The cloud was shown to have had a geological origin, and the formation of such a cloud was unusual in that region. The Azgeleh earthquake occurred near the High Zagros Fault (HZF), whereas its cloud had been formed 12 days earlier and about 700 km away from its epicenter, on other parts of the same fault, along a 160-km-long line. The study revealed that this high cloud consists of two parts: a high-pressure source and a tail diluted by the wind. Moreover, the moderate 2021 Sisakht earthquake cloud was found, which had been formed 6 days earlier and near the epicenter. Visually searching for earthquake clouds from the ground or space is a public scientific hobby, particularly among amateur meteorologists using satellite imagery. The formation of an earthquake cloud above a fault can be a warning of a possible impending earthquake on that fault, which, of course, requires further investigation.

Keywords: Precursor, Earthquake Cloud, Azgeleh Earthquake, High Zagros Fault, Meteosat-8

* .Corresponding author: Mostafa Heidari Email: heydary@gmail.com Tel:+989332352576

How to cite this Article: Heidari, M., Mazidi, A., & Rousta, I. (2024). Investigating the Earthquake Cloud Precursor in the 2017 Azgeleh Earthquake in Kermanshah, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 151-172.
DOI: 10.22067/geoeh.2022.75548.1186

Geography and Environmental Hazards
Volume 13, Issue 1 - Number 49, Spring 2024
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75548.1186
جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شمارهٔ چهل و نهم، بهار ۱٤۰۳، صص ۱۷۲-۱۵۱

مقاله پژوهشی

بررسی پیش‌نشانگر ابر زلزله در زمین‌لرزهٔ ۱۳۹٦ ازگلهٔ کرمانشاه

مصطفی حیدری[۱] - کارشناس ارشد سنجش‌ازدور دانشگاه یزد، یزد، ایران
دکتر احمد مزیدی - دانشیار اقلیم‌شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران
دکتر ایمان روستا - دانشیار اقلیم‌شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۲/۸ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۱/٤/٦ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/۵/۲

چکیده

ابر زلزله، پیش‌نشانگری باستانی و عینی است که گاه چند روز پیش از وقوع زلزله، بر فراز گسل مسبب زلزله و اغلب در نزدیکی رومرکز آن تشکیل می‌شود. مهم‌ترین مشخصهٔ ابر زلزله، جوشیدن آن از زمین و ساکن ماندن آن برای ساعاتی در آسمان است. هدف این پژوهش، یافتن ابر زلزلهٔ بزرگ ازگله در سال ۱۳۹٦ با تفسیر چشمی در تصاویر ماهوارهٔ متئوست-۸ و سپس بررسی ویژگی‌های آن ابر با استفاده از محصولات همان ماهواره است. با جستجو در تصاویر مادون‌قرمز، ابر زلزلهٔ ازگله شناسایی گردید و نشان داده شد که سرچشمه‌ای زمین‌شناسی دارد و تشکیل چنین ابری در آنجا مرسوم نیست. زلزلهٔ ازگله، نزدیک به گسل زاگرس مرتفع (HZF) رخ داده بود، ولی ابر آن ۱۲ روز پیشتر و حدود ۷۰۰ کیلومتر دورتر از رومرکز زلزله و در قطعات دیگری از همان گسل، در خطی به طول ۱٦۰ کیلومتر تشکیل شده بود. بررسی‌ها نشان داد این ابر مرتفع، از دو بخش تشکیل شده است: سرچشمه‌ای پرفشار

۱ نویسندهٔ مسئول: ۰۹۳۳۲۳۵۲۵۷٦ Email: heydary@gmail.com

نحوه ارجاع به این مقاله:

حیدری، مصطفی، مزیدی، احمد، روستا، ایمان؛ ۱٤۰۳. بررسی پیش‌نشانگر ابر زلزله در زمین‌لرزهٔ ۱۳۹٦ ازگلهٔ کرمانشاه. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۳(۱). صص ۱۷۲-۱۵۱

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75548.1186

و دنباله‌ای رقیق‌شده در دست باد. همچنین در این پژوهش، ابر زلزلهٔ متوسط سی‌سخت در سال ۱۳۹۹ نیز شناسایی گردید که ٦ روز پیشتر و نزدیک به رومرکز زلزله تشکیل شده بود. جستجوی چشمی ابر زلزله از زمین و فضا، یک سرگرمی علمی همگانی، به‌ویژه برای هواشناسان آماتور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای است. پدیدار شدن ابر زلزله بر فراز یک گسل، هشداری برای رخداد احتمالی زلزله‌ای قریب‌الوقوع در آن گسل است، که البته نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

کلیدواژه‌ها: پیش‌نشانگر، ابر زلزله، زلزلهٔ ازگله، گسل زاگرس مرتفع، متئوست–۸

۱– مقدمه

هر پارامتر فیزیکی یا شیمیایی در هر یک از لایه‌های لیتوسفر، اتمسفر یا یونسفر (LAI)[1] را که قبل از وقوع زلزله، شروع به تغییر کند، پیش‌نشانگر زلزله می‌گویند (**شمشیری و آخوندزاده هنزایی، ۱۳۹۵**). زلزله، رابطهٔ نزدیکی با پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی دارد و تاکنون ده‌ها پیش‌نشانگر شناخته شده است؛ همچون: ناهنجاری در دما و رطوبت خاک و هوا، تغییر در سرعت امواج لرزه‌ای و سرشت لرزه‌خیزی منطقه، تغییر شکل پوستهٔ زمین، افزایش انتشار گاز رادون، تغییر سطح تراز و ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی و دریا، تغییر محتوای کل الکترون (TEC)[2] و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و گرانشی زمین (**توکلی، ۱۳۹۸**). پیش از هر زلزله‌ای، همهٔ پیش‌نشانگرهای شناخته‌شده نمایان نمی‌شوند (**جهانی و آخوندزاده هنزایی، ۱۳۹٦**). با پایش پیوستهٔ گروهی از پیش‌نشانگرها می‌توان زلزله‌ها را با قطعیت بیشتری پیش‌بینی کرد (**بیت‌اللهی، بی‌تا**). استفاده از سنجش‌ازدور در بررسی پیش‌نشانگرهای زلزله از سال ۱۹۸۵ میلادی در روسیه با کار بر روی تصاویر حرارتی و بررسی تغییرات دمای سطحی زمین (LST)[3] آغاز شد. پس از زلزلهٔ ٦،۹ کوبهٔ ژاپن[4] در سال ۱۹۹۵ میلادی، مطالعهٔ سنجش‌ازدوری پدیده‌های الکترومغناطیسی در لیتوسفر، اتمسفر و یونسفر با هدف پیش‌بینی کوتاه‌مدت زلزله در ژاپن در دستور کار رسمی قرار گرفت (**علوی‌پناه و قربانی، ۱۳۸٦**). آینده در دست داده‌کاوی داده‌های گذشته (**حیاتی و همکاران، ۱۳۹۵**) و پایش آنی داده‌ها با ابزار هوش مصنوعی است (البنا و همکاران[5]، ۲۰۲۰).

از قدیمی‌ترین پیش‌نشانگرهای شناخته‌شدهٔ زلزله، ابر زلزله است. این پیش‌نشانگر، ساده و عینی است و تنها با نگریستن به آسمان و یا با بررسی تصاویر ماهواره‌ای، حتی توسط افراد آماتور نیز قابل‌شناسایی است.

1 Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling model
2 Total Electron Content
3 Land Surface Temperature
4 Kobe earthquake, Japan (1995)
5 Al Banna et al.

نخستین اشارۀ مکتوب به این پیش‌نشانگر، برای زلزلۀ ۷ گویوان شمالی چین[۱] در ۱۶۲۲ میلادی است. در تاریخ آن دیار چنین آمده است: امروز آفتابی و گرم، و آسمان صاف و آبی بود. ناگهان رشته‌هایی از ابر سیاه، چونان ماری دراز، آسمان را در برگرفت و برای مدتی طولانی باقی ماند. سپس زلزله آمد (لی[۲]، ۱۹۸۲). کشیش نیکولا لانگوباردو[۳] ایتالیایی که برای تبلیغ به پکن اعزام شده بود، در ۱۶۲۶ میلادی، کتاب تفسیر زلزله‌ها[۴] را منتشر ساخت. او در کتابش، پیش‌نشانگرهایی را که می‌شناخته چنین برشمرده است: تراوش نابهنجار گاز از زمین، بخار گرفتن چاه آب، تغییر مزۀ آب چاه و مدهای فوق‌العاده بلند. وی همچنین شرایط ویژۀ هواشناسی و تشکیل شکل‌های خاصی از ابرها را نیز به‌عنوان پیش‌نشانگر زلزله موردبررسی قرار داده است (مارتینلی[۵]، ۲۰۰۰).

پس از دوران باستان و در دورۀ اخیر، پیش‌بینی زلزله با پیش‌نشانگر ابر زلزله، در اواسط قرن ۲۰ میلادی در ژاپن و چین جانی دوباره گرفت و پس از چند پیش‌بینی موفق، در سال ۱۹۸۵ میلادی دوباره فراموش شد. مقالۀ دانشمند روسی لیدیا موروزوا[۶] (۱۹۹۷)، که شناسایی چند ناهنجاری خطی در ابرهای انبوه بالای گسلی فعال را در تصاویر ماهواره‌ای گزارش کرده است، اولین اشارۀ علمی به ارتباط احتمالی بین فعالیت‌های زمین‌شناسی و ابرها است. موضوع ابر زلزله، بار دیگر در اواخر قرن ۲۰ میلادی با کوشش ژونگائو شو[۷] چینی رونق گرفت. او با این پیش‌نشانگر، از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۱ میلادی، ۵۰ زلزله را به‌طور رسمی برای سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)[۸] پیش‌بینی و ثبت کرد و با تحقق یافتن ۳۴ مورد از آن‌ها، مدل خود را با صحت ۶۸ درصد به اثبات رساند. او حتی پیش از مهاجرت به آمریکا، دنبالۀ ابر زلزلۀ ۷٫۴ رودبار و منجیل سال ۱۹۹۰ میلادی را پیش از وقوع آن، با چشم خود در آسمان چین دیده بود. اوج کار او پیش‌بینی زلزلۀ ۶٫۷ بم سال ۲۰۰۳ میلادی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بود. او این پیش‌بینی را که دقت خوبی در تعیین مکان و بزرگای زلزله داشت، با پنجرۀ زمانی دوماهه، درست ۸ ساعت پیش از آن زلزلۀ مرگبار ثبت و منتشر ساخت (شو[۹]، ۲۰۰۶). هرچند که مدل نهایی ابر زلزلۀ شو در سال ۲۰۰۴ میلادی ارائه شد، اما دقت این مدل بالاتر نرفت و با تصاویر جدید ماهواره‌ای به‌روزرسانی نشد و به دلیل عدم قطعیت زیادی که در پیش‌بینی مکان و بزرگا و به‌ویژه زمان زلزله‌ها داشت رفته‌رفته کمرنگ و فراموش شد.

1 North Guyuan earthquake, China (1622)
2 Li
3 Niccolo Longobardo (1565-1655)
4 Interpretation of earthquakes (1626)
5 Martinelli
6 Lidia Morozova
7 Zhonghao Shou
8 United States Geological Survey
9 Shou

زلزله، حاصل شکستگی سنگ‌ها در اثر تنش ژئودینامیک موجود میان صفحات زمین‌ساختی پوستهٔ زمین است. افزایش تنش در صفحهٔ گسلی موجب بالا رفتن دما در لایه‌های زیرسطحی می‌گردد. این افزایش دما موجب تبخیر آب‌های زیرزمینی می‌شود. حرکت این بخارها که بخار زلزله نیز خوانده می‌شود به سمت بالا و سپس خروج آن از سطح زمین سبب سرد و متراکم شدن آن می‌شود؛ که در شرایط جوی مناسب و به‌ویژه در هوای سرد می‌توان انتظار تشکیل ابر را داشت. ابر زلزله، ماهیتی متفاوت از ابرهای هواشناسی دارد. وجه شناسایی آن، ثابت ماندن چشمهٔ زمینی آن برای چند ساعت تا چند روز در آسمان به‌رغم وجود نیروی کوریولیس و بادها است. ابر زلزله، گاه چشمه‌ای نقطه‌ای دارد و گاه به شکل خطی و اغلب در بالای گسل مسبب زلزله و در راستای زمین‌ساختی منطقه تشکیل می‌گردد **(صابر ماهانی و سپهوند، ۱۳۹٦)**. در تاریخ علم، گزارش‌ها و عکس‌هایی از رؤیت ابر زلزله از زمین وجود دارد که با شکل‌هایی همچون خطی، طنابی، موجی، ماری، گردبادی، دنده‌ای، تشعشعی و فلسی تعریف شده‌اند. علاوه بر داشتن شکل خاص حاصل از فشار بخار خروجی از گسل، تشکیل ناگهانی و ساکن ماندن آن در آسمان نیز از مهم‌ترین ویژگی‌های این ابرها است.

تا کنون دو مدل برای ابر زلزله ارائه شده است. نخست، مدل موروزوا یا پدیدهٔ دگازینگ[1] که طبق آن، گازهای پرفشار خروجی از گسل، ابرهای موجود در آسمان را خراشیده و شکافی در آن می‌اندازد که ناهنجاری ابری خوانده می‌شود. دوم، مدل شو یا پدیدهٔ دهیدراسیون[2] که طبق آن، فوران گازهای گرم و بخار آب، و صعود آن در هوای سرد و آسمان صاف، تبدیل به ابر می‌شود که ابر زلزله خوانده می‌شود. در این مدل، ابر زلزله از چند ساعت تا ۱۰۳ روز پیش از وقوع زلزله و به‌طور میانگین تا ۳۰ روز پیش از زلزله، در آسمان تشکیل می‌شود و برای ساعاتی بر فراز گسل مسبب زلزله ساکن می‌ماند (**منصوری دانشور و همکاران، ۱۳۹۱**).

خروج بخارهای گرم از گسل، گاه چنان پرفشار است که از عوامل مشکوک به ایجاد سوانح هوایی می‌باشد (شو و همکاران[3]، ۲۰۱۰). پژوهش‌ها، تشکیل ابر زلزله را در اثر یونیزاسیون سنگ‌کره می‌دانند (فروند[4]، ۲۰۱۳؛ هریسون و همکاران[5]، ۲۰۱٤). پژوهش‌هایی دیگر آن را حاصل افزایش میزان آیروسل جو و همزمان با افزایش ضخامت نوری اتمسفر (AOT)[6] دانسته‌اند (پولینتس و همکاران[7]، ۲۰۱٤). تلاش‌هایی نیز برای نوشتن الگوریتم تشخیص خودکار ابر زلزله در تصاویر ماهواره‌ای جهت پیش‌بینی زلزله شده است

1 Degassing
2 Dehydration
3 Shou et al.
4 Freund
5 Harrison et al.
6 Atmospheric Optical Thickness
7 Pulinets et al.

(جینگ و همکاران[۱]، ۲۰۱۵)؛ اما گروهی از پژوهشگران، ارتباط ابرها با زلزله‌ها را هنوز داری پایهٔ علمی کافی نمی‌دانند (ترونین[۲]، ۲۰۱۰). این منتقدان، ابرهای زلزله با چشمهٔ خطی را مرسوم و حاصل عبور و صعود تودهٔ هوای مرطوب از رشته‌کوه منطقه می‌دانند (توماس و همکاران[۳]، ۲۰۱۵). البته پژوهشگران ابر زلزله نیز پاسخ منتقدان را با اثبات آماری وجود همبستگی میان بروز ابر زلزله و رخداد زلزله داده‌اند (گوانگ‌منگ[٤]، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲).

مدل‌های ابر زلزله، نرخ مناسبی از زلزله‌های بزرگ را پیش‌بینی کرده‌اند. بررسی آرشیو تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که برخی از زلزله‌های بزرگ دارای پیش‌نشانگر ابر زلزله بوده‌اند. مقالات چندی از یافتن ابر زلزله در آسمان کشورهای ژاپن (انوموتو[٥]، ۲۰۰۲؛ ترونین و همکاران[٦]، ۲۰۰۲؛ اوندوه[۷]، ۲۰۰۳؛ گو و ژی[۸]، ۲۰۰۷)، چین (لی‌ژین و همکاران[۹]، ۲۰۰۹)، ایتالیا (گوانگ‌منگ و جی[۱۰]، ۲۰۱۳)، ترکیه، آمریکا (پولینتس و همکاران[۱۱]، ۲۰۱٤) و ایران منتشر شده است.

شو که خود مدل ابر زلزله را ارائه داده بود، ابر زلزلهٔ ٦٫۷ بم کرمان سال ۲۰۰۳ میلادی را از چند روز پیش از زلزله در نظر داشت و ۸ ساعت پیش از رخداد آن، پیش‌بینی خود را با بزرگای ٥٫٥ یا بیشتر روی گسل بم و در پنجره‌ای دو ماهه منتشر ساخت (هرینگتون و شو[۱۲]، ۲۰۰٥). گو و وانگ[۱۳] (۲۰۰۸)، ناهنجاری‌های ابری مربوط به دو زلزلهٔ ٦٫۲ زرند کرمان سال ۲۰۰٥ میلادی و ٥٫۷ فاریاب کرمان سال ۲۰۰٦ میلادی را به ترتیب ٦۹ و ٦٤ روز پیش از رخداد زلزله‌ها شناسایی کرده‌اند. **صابر ماهانی و سپهوند (۱۳۹٦)** موفق به شناسایی ابر خطی زلزلهٔ ٦٫٥ محمدآباد ریگان کرمان سال ۱۳۸۹ در امتداد خط گسل گردیدند. گوانگ‌منگ و جی[۱٤] (۲۰۱۳)، دو زلزلهٔ ٥٫٤ راور کرمان و ٤٫۸ بیشه‌زار ایلام سال ۲۰۱۲ میلادی را به ترتیب ۸ و ۷ روز قبل از رخداد زلزله‌ها با تاریخ و بزرگای قابل‌قبول پیش‌بینی کردند. پولینتس و همکاران[۱٥] (۲۰۱٤)، ابری خطی و نازک را که سه روز پیش از زلزلهٔ دوقلوی ٦٫٥ و ٦٫۳ اهر ورزقان آذربایجان شرقی

1 Jing et al.
2 Tronin
3 Thomas et al.
4 Guangmeng
5 Enomoto
6 Tronin et al.
7 Ondoh
8 Guo & Xie
9 Li-Xin et al.
10 Guangmeng & Jie
11 Pulinets et al.
12 Harrington & Shou
13 Guo & Wang
14 Guangmeng & Jie
15 Pulinets et al.

سال ۲۰۱۲ میلادی بر فراز دریای خزر ظاهر شده بود، یافته‌اند. منصوری دانشور و همکاران[1] (۲۰۱٤)، افزایش ابرناکی و ظهور ابرهای غیرمعمول با شکل خطی و موجی در ارتفاع پایین در مقیاس محلی، و ظهور ابرهای متلاطم چرخشی در ارتفاع بالا در مقیاس سینوپتیک را که یک هفته قبل از رخداد زلزلهٔ ۷،۵ سراوان سیستان و بلوچستان سال ۲۰۱۳ میلادی بر فراز کانون آن رخ داده بوده را گزارش کرده‌اند.

ایران روی کمربند زلزلهٔ آلپ هیمالیا و در عرصه‌گاه برخورد صفحهٔ عربستان با اوراسیا قرار دارد و از کشورهای لرزه‌خیز دنیا محسوب می‌شود. تاریخ این سرزمین، به‌جز در صفحات ایران مرکزی، زلزله‌های فراوان و ویرانگری را روایت کرده است (**حسینی، ۱۳۹۵**). شناخت و پایش این پیش‌نشانگر حتی در قالب فعالیت‌های آماتوری، می‌تواند در پیش‌بینی زلزله‌های بزرگ به‌ویژه در سامانه‌های گسلی فعال و مناطق پرجمعیتی همچون زاگرس، نقش مؤثری داشته باشد.

در این پژوهش، ابر زلزلهٔ ۷،۳ ازگلهٔ کرمانشاه سال ۱۳۹٦ با در نظر گرفتن سیستم گسلی زاگرس در تصاویر ماهواره‌ای جستجو شد. با یافته شدن یک مورد مشکوک به ابر زلزله، ابتدا سرچشمهٔ رطوبتی آن با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مسیر ابر، بررسی گردید؛ و سپس مرسوم نبودن تشکیل چنین ابری در آن منطقه در آرشیو تصاویر ماهواره‌ای مورد بازبینی قرار گرفت. درنهایت، پس از اطمینان به زمینی بودن و مرسوم نبودن تشکیل آن در منطقه، ویژگی‌های آن ابر موردبررسی قرار گرفت. این پژوهش، ابرهای مشکوک به زلزله را در چارچوب سیستم گسلی منطقه بررسی می‌کند و برای اولین بار بر آزمون منشایابی و همچنین مرسوم نبودن آن‌ها تأکید دارد.

۲- منطقهٔ موردمطالعه

روز یکشنبه ۱۳۹٦/۸/۲۱ ساعت ۲۱:٤۸ به‌وقت‌ایران، زلزله‌ای به بزرگای ۷،۳ و عمق ۱۸ کیلومتر در استان کرمانشاه در نزدیکی شهرهای ازگله، تازه‌آباد، قصر شیرین و سرپل ذهاب و چسبیده به مرز عراق رخ داد. در تاریخ، دو زلزلهٔ دیگر با بزرگای حدود ٦،۵ در سال‌های ۹۵۸ و ۱۲۲٦ میلادی در همین حوالی ثبت شده است (**مرکز لرزه‌نگاری کشوری، ۱۳۹٦**). این زلزله به چند شهر و هزاران روستا آسیب رساند و صدها کشته، هزاران مصدوم و ده‌ها هزار بی‌خانمان بر جای گذاشت و در پی عدم تاب‌آوری مردم، پیامدهای ناگواری به بار آورد (**شهبازی و همکاران، ۱٤۰۰**)؛ چنان که از سال ۱۳۸۲ و زلزلهٔ بم تاکنون، پرخسارت‌ترین زلزلهٔ ایران می‌باشد. زلزلهٔ ازگله باعث بروز انواع ناپایداری‌ها ازجمله سنگ‌ریزش و زمین‌لغزش نیز شد (**نادری و همکاران، ۱٤۰۰**). مشخصات این زلزله، از چندین منبع معتبر دریافت گردید (جدول ۱) و به نقشه درآمد (شکل ۲).

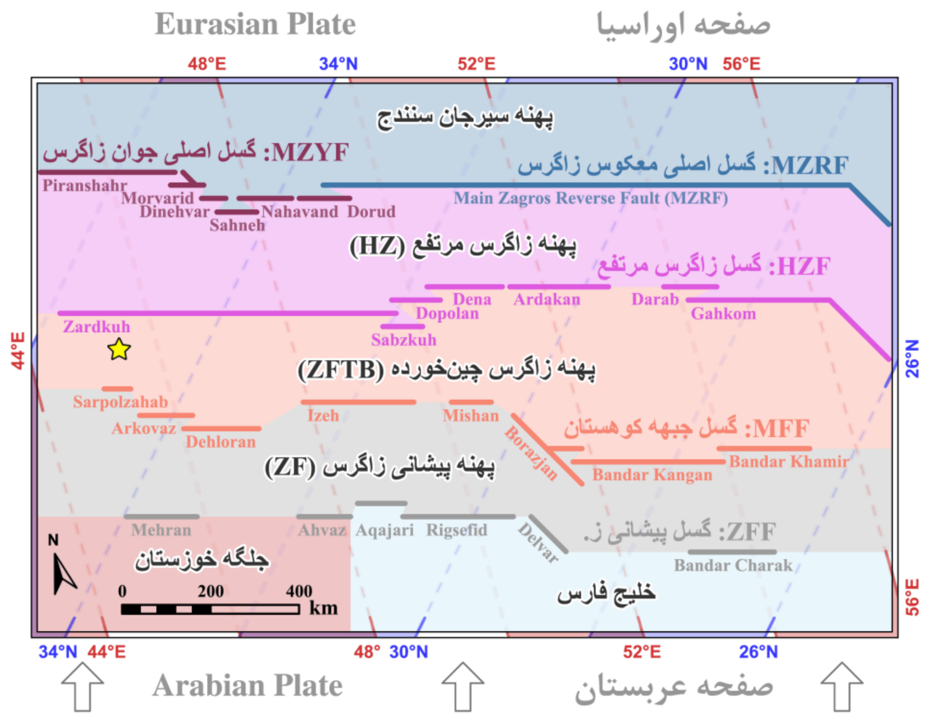
1 Mansouri Daneshvar et al.

جدول ۱- مشخصات زلزلهٔ ۱۳۹٦ ازگله به تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۲ میلادی

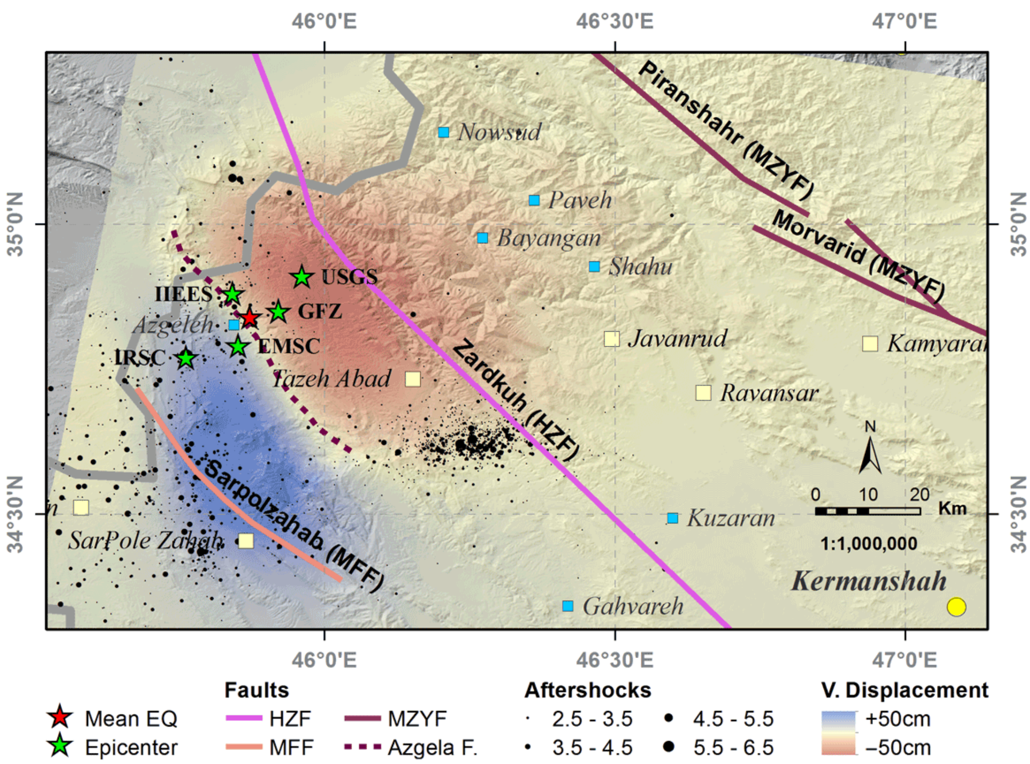
کد	زمان (UTC)	طول (E)	عرض (N)	عمق (km)	بزرگا (M)	منبع گزارش
IRSC	۱۸:۱۸:۱٦،٤	٤۵،۷٦	۳٤،۷۷	۱۸	۷،۳	مرکز لرزه‌نگاری کشوری، دانشگاه تهران
IIEES	۱۸:۱۸:۱۷،۸	٤۵،۸٤	۳٤،۸۸	۱۸	۷،۳	پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی ایران
USGS	۱۸:۱۸:۱۷،۲	٤۵،۹٦	۳٤،۹۱	۱۹	۷،۳	سازمان زمین‌شناسی آمریکا
EMSC	۱۸:۱۸:۱۷،۳	٤۵،۸۵	۳٤،۷۹	۲٤	۷،۳	مرکز زلزله‌شناسی اروپا و مدیترانه
GFZ	۱۸:۱۸:۱۷،۲	٤۵،۹۲	۳٤،۸۵	۲۲	۷،۳	مرکز پژوهشی علوم زمین آلمان
میانگین	۱۸:۱۸:۱۷،۲	٤۵،۸۷	۳٤،۸٤	۲۰	۷،۳	-

بررسی مکانیسم کانونی زلزله نشان داده که شکستگی در گسلی کور در پهنهٔ زاگرس چین‌خورده (ZFTB)[1] علت این زلزله بوده است. این گسل پیشتر ناشناخته که گسل ازگله نام گرفته، در عمق ۱۰ کیلومتری با گسل جبههٔ کوهستان (MFF)[2] و در عمق ۱۸ کیلومتری که همان عمق کانونی این زلزله هست با گسل زاگرس مرتفع (HZF)[3] تلاقی دارد (کوانگ و همکاران[4]، ۲۰۱۹). سامانه‌های گسلی زاگرس، از اطلس نقشه‌های لرزه‌خیزی استان‌های ایران (**مرکز لرزه‌نگاری کشوری، ۱۳۹٤**) استخراج شد (شکل ۱) و به نقشه درآمد (شکل ۲).

1 Zagros Fold and Thrust Belt
2 Mountain Front Fault
3 High Zagros Fault
4 Kuang et al.



شکل ۱- نمایش شماتیک سامانه‌های گسلی زاگرس. ابعاد و مختصات این نقشه دقیق نیست.



شکل ۲- موقعیت رومرکز زلزله طبق گزارش منابع مختلف (جدول ۱) در سیستم گسلی زاگرس (شکل ۱).

۳- مواد و روش

۱-۳- دریافت تصاویر و داده‌های موردنیاز

برای یافتن ابرهای مشکوک، از تصاویر ماهوارهٔ هواشناسی اروپایی متئوست–۸[1] استفاده شد. این ماهوارهٔ زمین‌مرجع در ارتفاع ۳٦ هزار کیلومتری و در طول جغرافیایی ٤۱٫۵ درجهٔ شرقی، بر فراز استوا مستقر است؛ و از فوریهٔ ۲۰۱۷، مهم‌ترین ماهوارهٔ هواشناسی منطقهٔ اقیانوس هند و بهترین ماهوارهٔ هواشناسی برای بررسی آسمان ایران است. توان تفکیک مکانی باندهای غیرپانکروماتیک آن ۳ کیلومتر و توان تفکیک زمانی آن ۱۵ دقیقه می‌باشد که از اکتبر ۲۰۱۸ به ۵ دقیقه بهبود یافته است. این ماهواره افزون بر تصاویر خام، ۲۵ محصول نیز در دسته‌بندی‌های آتش‌سوزی، آیروسل، تابش، بازتابش، اقلیم، ابر، بارش، شاخص گیاهی، ازون، رطوبت تروپسفری و خاکسترهای آتشفشانی دارد که ۵ عدد از آن‌ها دربارهٔ ابرها است (جدول ۲).

جدول ۲- فهرست محصولات ماهوارهٔ متئوست–۸ در زمینهٔ ابرها

کد	عنوان محصول	رزولوشن زمانی	توضیحات
CLA	تحلیل ابر	۱ ساعت	لایه‌های ابر، ارتفاع ابر، دمای ابر و ...
CLAI	تصویر تحلیل ابر	۳ ساعت	نوع ابر
CLM	ماسک ابر	۱۵ دقیقه	تشخیص آسمان صاف یا ابری
CTH	ارتفاع رویهٔ ابر	۱۵ دقیقه	ارتفاع رویهٔ ابر
OCA	تحلیل ابر بهینه	۱۵ دقیقه	فاز ابر، فشار ابر، ضخامت نوری ابر و ...

وبگاه‌های هواشناسی نیز محصولاتی از تصاویر خام این ماهواره تولید می‌کنند که به خاطر راحتی مشاهده و دریافت آن‌ها و افزوده شدن لایهٔ شهرها و مرزهای کشوری و استانی، بسیار مناسب تفسیر چشمی جهت یافتن ابرهای مشکوک می‌باشند. درنهایت، محصول مادون‌قرمز این ماهواره، تولید وبگاه Weather.us با برش و مرز کشور ایران، در بازهٔ دو ماههٔ پیش و کمی پس از زلزله با توان تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه، شامل ۵۷٦۰ تصویر دریافت گردید (جدول ۳).

جدول ۳- بازهٔ زمانی دریافت تصاویر مادون‌قرمز با توان تفکیک زمانی ۱۵ دقیقه

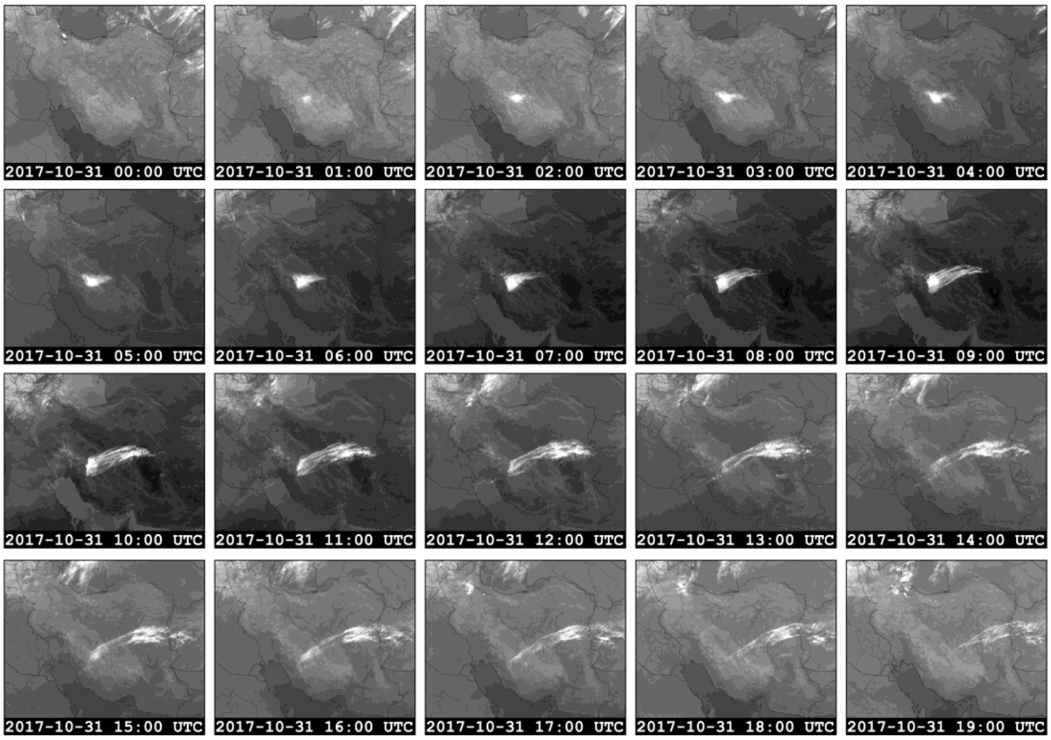
تقویم	نخستین تصویر	زلزله	واپسین تصویر
جهانی (UTC)	۲۰۱۷/۰۹/۲۳ ۰۰:۰۰	۲۰۱۷/۱۱/۱۲ ۱۸:۱۸	۲۰۱۷/۱۱/۲۱ ۲۳:٤۵
ایرانی (IRT)	۱۳۹٦/۰۷/۰۱ ۰۳:۳۰	۱۳۹٦/۰۸/۲۱ ۲۱:٤۸	۱۳۹٦/۰۹/۰۱ ۰۳:۱۵

1 MSG Indian Ocean 41.5° E Meteosat-8 (IODC: Indian Ocean Data Coverage)

۲-۳- روش انجام پژوهش

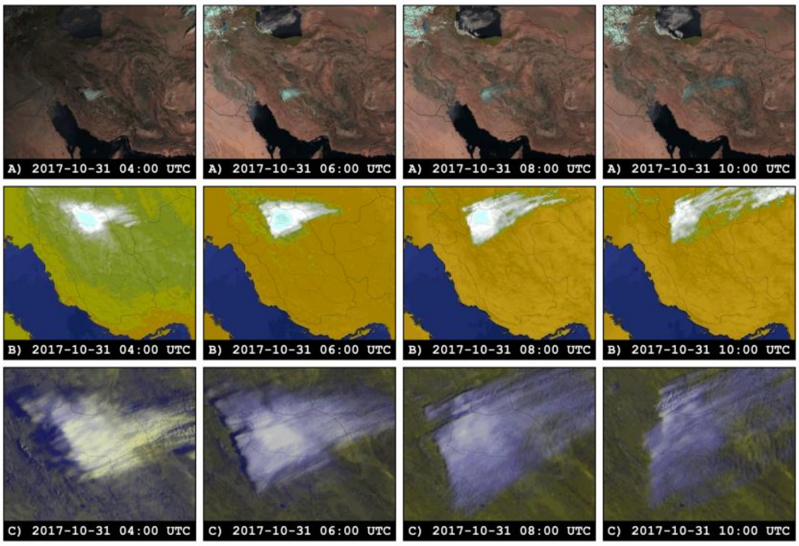
۱-۲-۳- جستجوی چشمی ابر زلزله

سری تصاویر مادون‌قرمز دریافت‌شده، جهت یافتن ابرهای مشکوک، به‌صورت متوالی و پویا مشاهده و بررسی شد. شدیدترین مورد مشکوک به ابر زلزله، مربوط به ابری است که در تاریخ ۲۰۱۷/۱۰/۳۱ میلادی برابر با ۱۳۹٦/۰۸/۰۹، یعنی ۱۲ روز قبل از زلزله، از آغازین ساعات روز با شدت از چشمه‌ای خطی موازی با رشته‌کوه دنا در حوالی یاسوج تشکیل می‌شود و به‌رغم وجود باد غربی، برای بیش از ۱۰ ساعت در آسمان ثابت می‌ماند (شکل ۳). این ابرزایی شدید، اگر سرچشمه‌ای زمینی داشته باشد، می‌تواند نشانه‌ای از فعالیت شدید گسلی و هشداری برای زلزله‌ای قریب‌الوقوع و احتمالی در آن گسل باشد.



شکل ۳- تصاویر سری زمانی محصول Infrared در روز ۲۰۱۷/۱۰/۳۱ میلادی.

پس از یافتن این ابر مشکوک، دیگر محصولات تصویری آن وبگاه در آن روز نیز دریافت و مراحل شکل‌گیری، شدت یافتن و زوال آن ابر در آن‌ها مشاهده شد (شکل ٤).



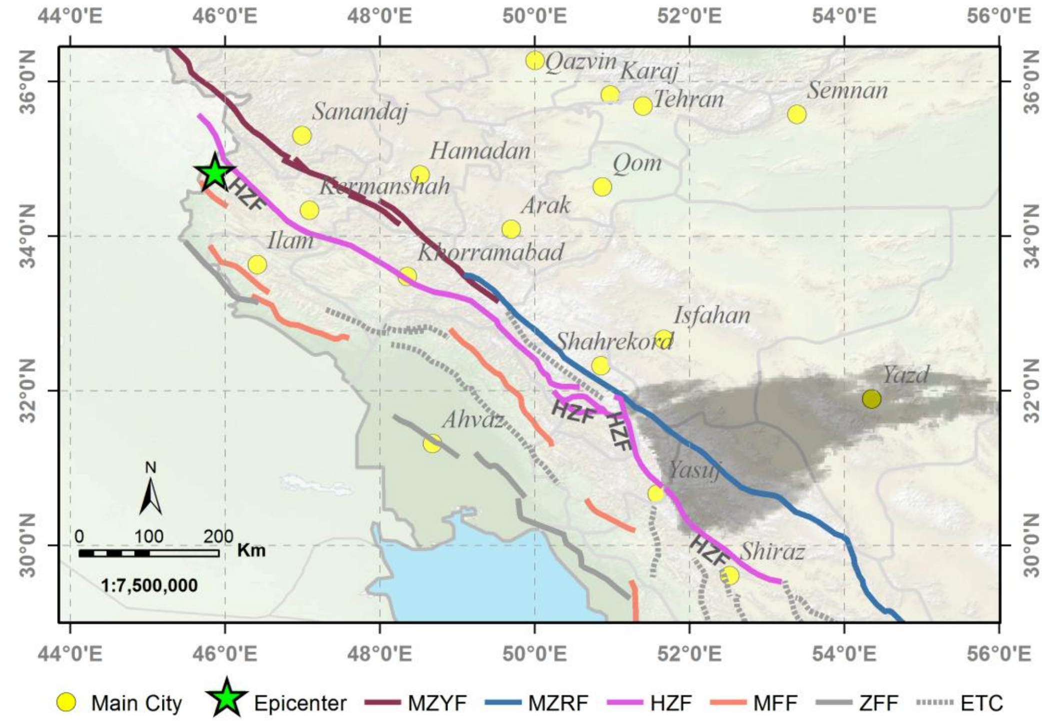
شکل ٤- تصاویر سری زمانی ابر مشکوک در محصول A) Color ایران؛ B) Nature جنوب ایران؛ C) HD ابر.

پس از به نقشه درآوردن تصاویر مادون‌قرمز ابر مشکوک، دیده شد که این ابرزایی از خطی مستقیم به طول ۱٦۰ کیلومتر و در راستای تقریبی NNW-SSE بر فراز بخش‌هایی از گسل‌های دنا و اردکان رخ داده است. گسل‌های دنا و اردکان از قطعات گسل زاگرس مرتفع (HZF) هستند (شکل ۱ و جدول ٤)؛ همان گسلی که ۱۲ روز بعد و ۷۰۰ کیلومتر دورتر، در نزدیکی قطعهٔ زردکوه آن، زلزلهٔ ازگله رخ داده است (شکل ۵ و ٦). تشکیل نشدن دقیق ابر روی خط گسل به دلیل وجود باد و مدت‌زمان موردنیاز برای رسیدن بخارها به ارتفاع سرد برای میعان است (گو و ژی[1]، ۲۰۰۷).

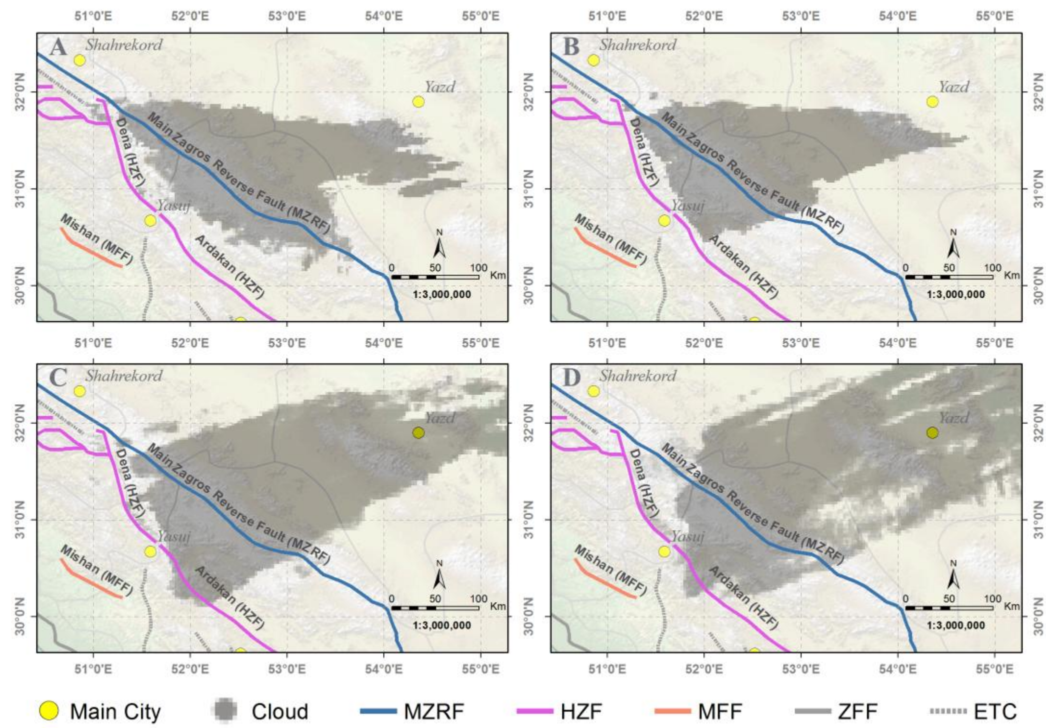
جدول ٤- قطعات سامانهٔ گسلی زاگرس مرتفع (HZF) از شمال غرب به جنوب شرق

نام قطعه	طول (km)	مراکز استان نزدیک	نام قطعه	طول (km)	مراکز استان نزدیک
۱- زردکوه	۷۵۷	کرمانشاه، خرم‌آباد	**۵- اردکان**	۲۳۵	یاسوج، شیراز
۲- سبزکوه	۹۰	-	**٦- داراب**	۱۲۰	-
۳- دوپلان	۱۱۳	-	**۷- گهکم**	۵۱۸	بندرعباس
٤- دنا	۱۷۳	یاسوج	**جمع**	۲۰۰٦	-

1 Guo & Xie



شکل ۵- موقعیت ابر مشکوک در 2017/10/31 07:30 UTC نسبت به گسل HZF و رومرکز زلزلهٔ ازگله.



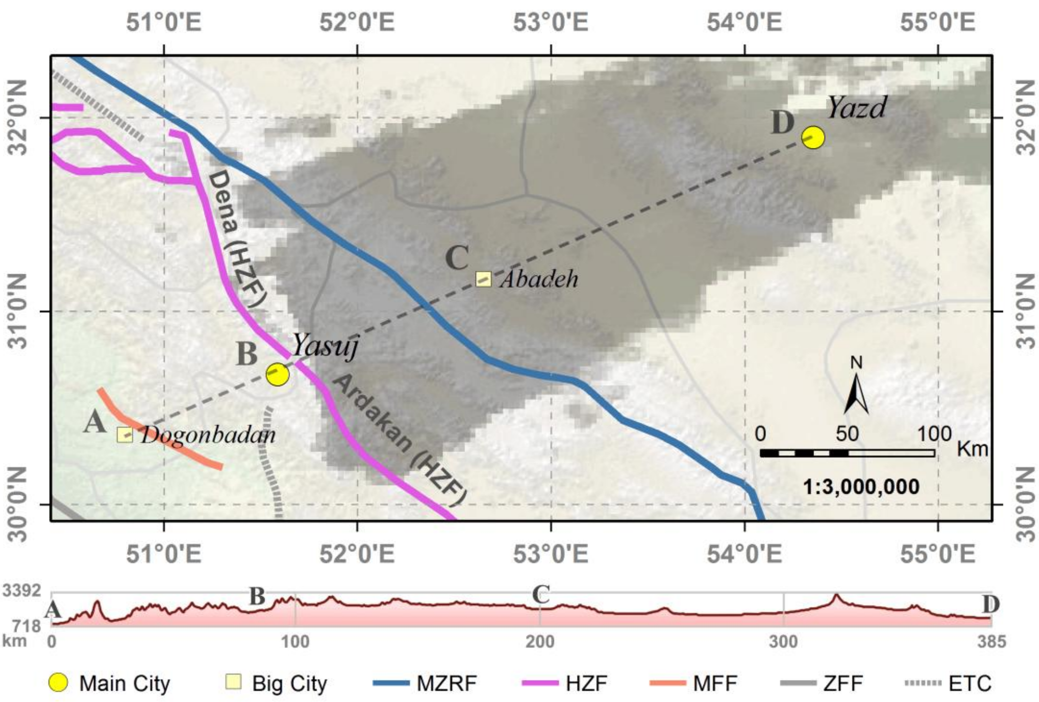
شکل ٦- سری نقشه‌های ابر مشکوک در زمان‌های A UTC) 04:00؛ B) 06:00؛ C) 08:00؛ D) 10:00.

۲-۲-۳- آزمون منشایابی ابر مشکوک

می‌توان احتمال داد که تشکیل چنین ابری با سرچشمهٔ خطی و ثابت، در اثر عبور و صعود تودهٔ هوای مرطوب از رشته‌کوه باشد (توماس و همکاران[1]، ۲۰۱۵). برای رد کردن آن، چهار ایستگاه سینوپتیک در راستای باد غالب انتخاب (شکل ۷) و داده‌های هواشناسی آن‌ها در آن روز از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. سپس با استفاده از رابطهٔ (۱)، رطوبت ویژهٔ هر ایستگاه در طول آن روز محاسبه گردید (بولتون[2]، ۱۹۸۰).

$$q = \frac{621.98 \times e}{P - (0.378 \times e)}$$ رابطهٔ (۱)

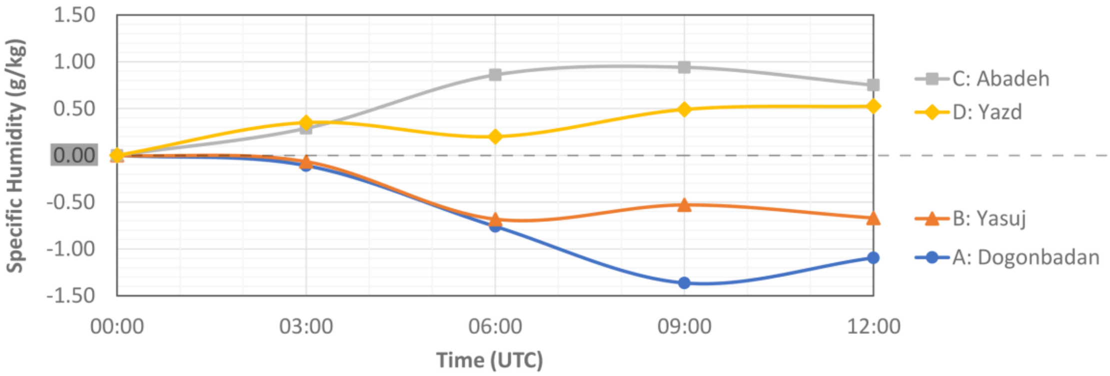
در رابطهٔ بالا، q رطوبت ویژه (g/kg) و e و P به ترتیب، فشار بخار و فشار هوا با واحدی یکسان می‌باشند. رطوبت ویژه، عبارت است از وزن بخار آب در واحد وزن هوای مرطوب. ازآنجایی‌که این پارامتر، ثبات زیادی دارد، نقش ویژه‌ای در تجزیه‌وتحلیل و سنجش میزان رطوبت هوا یافته است. رطوبت ویژه، متأثر از دمای هوا نیست و میزان آن تنها با تغییر واقعی مقدار بخار آب تغییر می‌کند (**علی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱**).



شکل ۷- ایستگاه‌های مسیر باد و پروفیل ارتفاعی خط با اغراق 5x. A) دوگنبدان؛ B) یاسوج؛ C) آباده؛ D) یزد.

1 Thomas et al.
2 Bolton

با کسر کردن رطوبت ویژهٔ هر ایستگاه در طول روز از رطوبت ویژهٔ همان ایستگاه در ساعت آغازین همان روز، روند تغییرات تفاضلی و استاندارد رطوبت ویژه در هر ایستگاه در طول روز به دست آمد (شکل ۸).



شکل ۸- روند تغییرات تفاضلی و استاندارشدهٔ رطوبت ویژه در چهار ایستگاه خطی در ۲۰۱۷/۱۰/۳۱ میلادی.

طبق این نمودار، روند تغییرات رطوبت ویژه در دو ایستگاه قبل با دو ایستگاه بعد از گسل متفاوت است. در ایستگاه‌های دوگنبدان و یاسوج، همزمان با ابرزایی، کاهش رطوبت ویژه رخ داده؛ ولی در ایستگاه آباده همزمان با ابرزایی و همچنین در ایستگاه یزد هم با چند ساعت تأخیر، افزایش رطوبت ویژه روی داده است. این تفاوت در روند تغییرات رطوبت ویژه در ایستگاه‌ها، می‌تواند نشانه‌ای بر خروج رطوبت از خط گسل و انتشار آن با باد غربی و در نتیجه تأیید منشأ زمین‌شناسی این ابر باشد.

۳-۲-۳- آزمون مرسوم نبودن ابر مشکوک

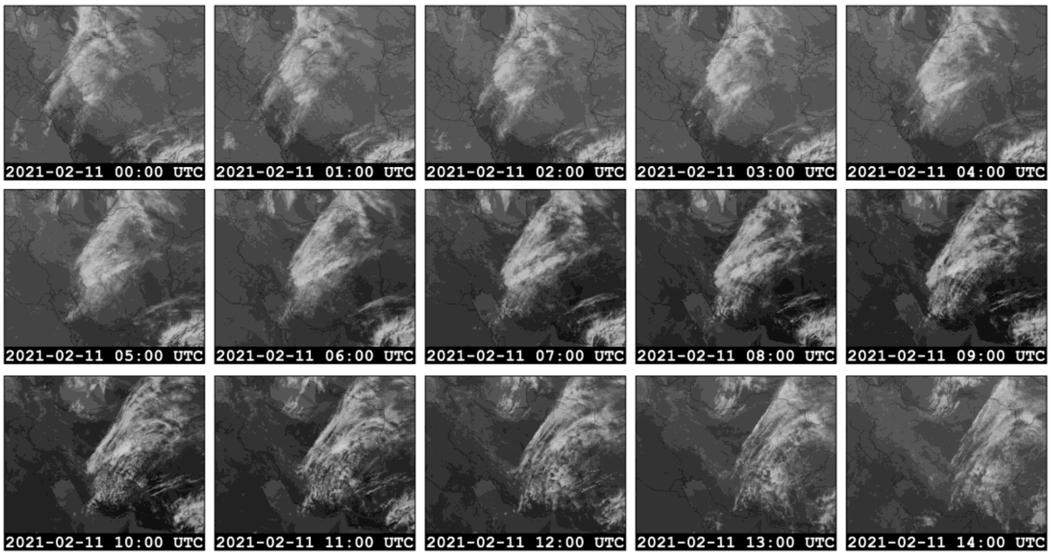
احتمال دیگر این است که تشکیل چنین ابری در این منطقه مرسوم باشد و ارتباطی به زلزله نداشته باشد (توماس و همکاران[1]، ۲۰۱۵). برای رد کردن این احتمال، محصول مادون‌قرمز مربوط به این منطقه، در بازهٔ تاریخی بیش از ٤ سال با توان تفکیک زمانی ٦ ساعت، شامل ٦١٩٢ تصویر دریافت گردید (جدول ٥).

جدول ٥- بازهٔ زمانی دریافت تصاویر مادون‌قرمز با توان تفکیک زمانی ٦ ساعت.

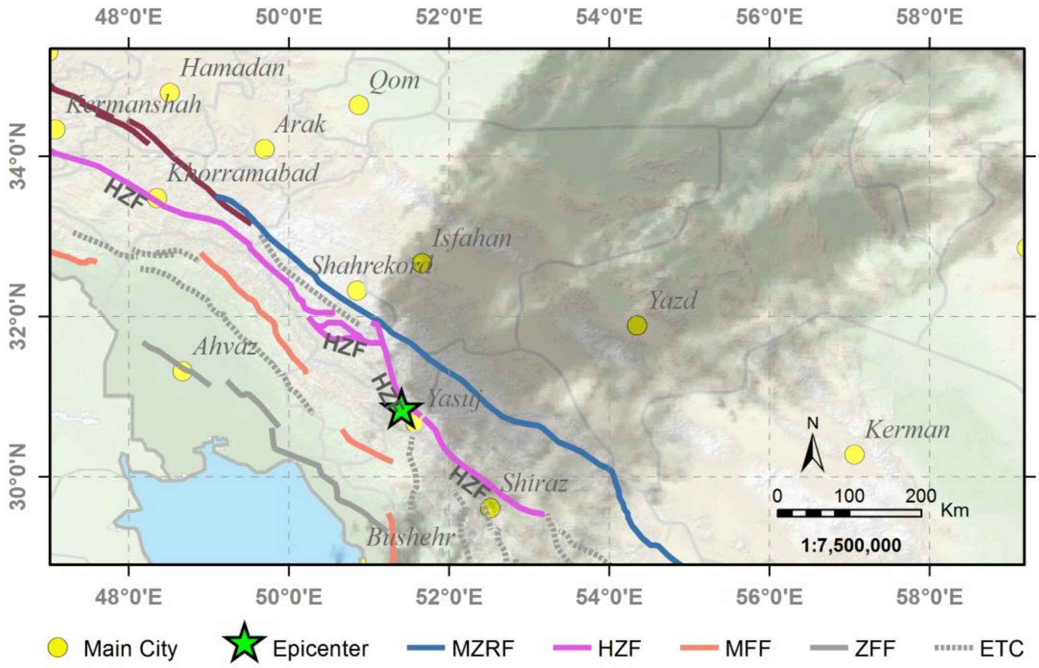
تقویم	نخستین تصویر	زلزله	واپسین تصویر
جهانی (UTC)	۲۰۱۷/۰۲/۰۳ ۰۰:۰۰	۲۰۱۷/۱۱/۱۲ ۱۸:۱۸	۲۰۲۱/۰٤/۳۰ ۱۸:۰۰
ایرانی (IRT)	۱۳۹٥/۱۱/۱٥ ۰۳:۳۰	۱۳۹٦/۰۸/۲۱ ۲۱:٤۸	۱٤۰۰/۰۲/۱۰ ۲۲:۳۰

1 Thomas et al.

سری این تصاویر نیز جهت یافتن ابرهای مشکوک بررسی شد. تنها مورد مشکوک دیگری که در این منطقه و با این توان تفکیک زمانی قابل‌تشخیص بود، مربوط به ابری است که در تاریخ ۲۰۲۱/۰۲/۱۱ میلادی برابر با ۱۳۹۹/۱۱/۲۳، یعنی ٦ روز قبل از زلزلهٔ ۵٫٤ سی‌سخت کهگیلویه و بویر احمد، از چشمه‌ای خطی بر فراز گسل دنا و بخشی از گسل اردکان تشکیل شده و برای بیش از ۱۰ ساعت ساکن مانده است (شکل ۹ و ۱۰).



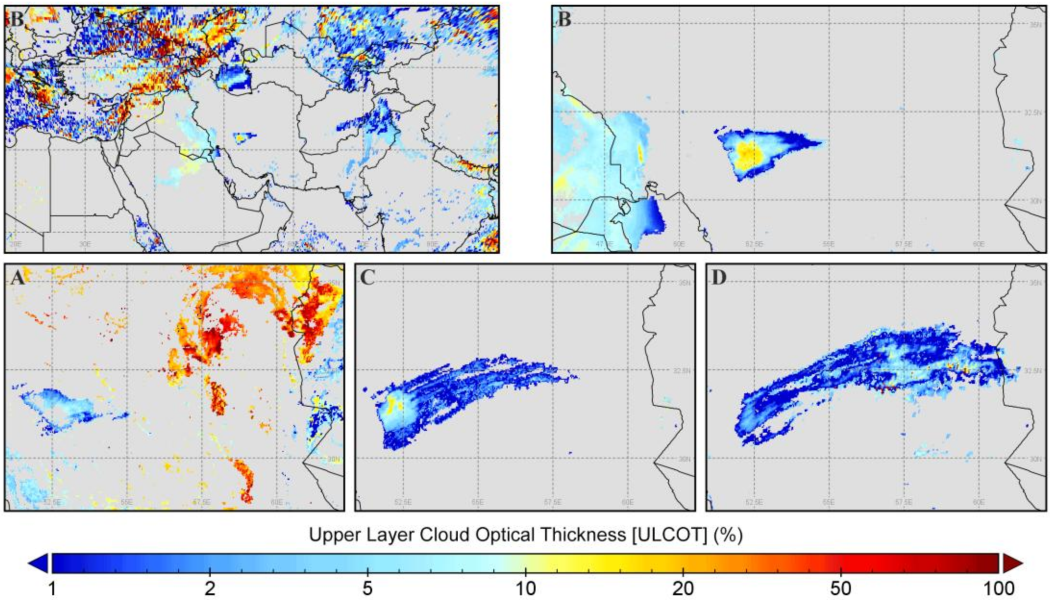
شکل ۹- تصاویر سری زمانی محصول Infrared در روز ۲۰۲۱/۰۲/۱۱ میلادی.



شکل ۱۰- موقعیت ابر مشکوک در 2021/02/11 07:00 UTC نسبت به گسل HZF و رومرکز زلزلۀ سی‌سخت.

٤-۲-۳- بررسی ویژگی‌های ابر زلزله

برای شناخت ابر زلزلۀ ازگله، محصولات ماهوارۀ متئوست-۸ برای آن روز دریافت گردید (جدول ۲). محصول CLAI، اطراف و مرکز آن ابر را به ترتیب جزو ابرهای مرتفع کومولونیمبوس و سیروس می‌داند. محصول CTH نیز رویۀ آن را از مرتفع‌ترین ابرها دانسته که مرکزش ۱۰ و دنباله‌اش تا ۱۵ کیلومتر ارتفاع دارد. محصول OCA، آن را ابری کم‌فشار می‌داند که ضخامت نوری در مرکزش زیاد و در دنباله‌اش ناچیز است (شکل ۱۱) و شعاع مؤثر قطرات آن در مرکزش ۸ یا فاز آبی و در دنباله‌اش ۲۰ میکرومتر یا فاز یخی می‌باشد.



شکل ۱۱- ضخامت نوری ابر زلزلهٔ ازگله در زمان‌های A UTC) 03:00؛ B) 06:00؛ C) 09:00؛ D) 12:00.

همهٔ محصولات، این ابر را نامتجانس می‌دانند که از دو بخش چشمهٔ پرفشار مرکزی و دنبالهٔ رقیق‌شده تشکیل شده است. این می‌تواند دلیلی بر وجود چشمه‌ای زمینی در این ابر باشد که دنباله‌ای در دست باد دارد.

٤- نتایج و بحث

طبق مدل شو، ابر زلزله، در هوای سرد به‌طور متوسط تا ۳۰ روز پیش از وقوع زمین‌لرزه، روی گسل مسبب آن و بر فراز کانون آن تشکیل می‌شود و به‌طور متوسط تا ۱۰ ساعت در آسمان می‌ماند؛ و جرم و شدت جوشش آن ابر با بزرگای زلزله ارتباط مستقیم دارد (شو[1]، ۲۰۰٦). ابر زلزلهٔ سی‌سخت، درست مطابق این مدل است اما ابر زلزلهٔ ازگله در مورد تشکیل نشدن بر فراز کانون، از این مدل سرپیچی دارد.

ابر زلزلهٔ سی‌سخت روی گسل‌های دنا و اردکان از قطعات گسل زاگرس مرتفع تشکیل شده بود و بسیار نزدیک به کانون زلزله قرار داشت. ولی ابر زلزلهٔ ازگله با اینکه روی همان گسل مسبب زلزله یعنی گسل زاگرس مرتفع قرار داشت، ولی از کانون زلزله حدود ۷۰۰ کیلومتر دور و در قطعهٔ دیگری از آن گسل تشکیل شده بود. گسل زاگرس مرتفع از غرب تا جنوب ایران کشیده شده و از چندین قطعه گسل تشکیل شده است. ابر زلزله روی قطعات دنا و اردکان تشکیل شده بود ولی کانون زلزله در نزدیکی قطعهٔ زردکوه قرار

1 Shou

داشت. در هر دو زلزله، ابر بر فراز قطعات گسلی دنا و اردکان تشکیل شده است؛ گویا این دو قطعهٔ گسلی می‌توانند شاخص حرارتی خوبی برای فعالیت سراسر سامانهٔ گسلی زاگرس مرتفع محسوب گردند.

با این پژوهش می‌توان گفت زلزله‌های ازگله و سی‌سخت دارای پیش‌نشانگر ابر زلزله بوده‌اند. بر اساس یافته‌های این پژوهش در مورد زلزلهٔ ازگله، ابر زلزله لازم نیست حتماً بر فراز کانون زلزله تشکیل شده باشد، بلکه می‌تواند از کانون زلزله صدها کیلومتر دورتر ولی روی همان سامانهٔ گسلی تشکیل شود؛ بنابراین می‌توان مدل شو را از تراوش بخار از کانون زلزله، به تراوش بخار از گسل مسبب آن زلزله اصلاح کرد.

آخرین پژوهش‌ها روی ابرهای زلزله و زلزله‌های ایتالیا، وجود همبستگی میان این دو پدیده را اثبات می‌کند؛ چنان که ۷۰ درصد زلزله‌های با بزرگای ٤٫۷ و بیشتر، دارای پیش‌نشانگر ابر زلزله بوده‌اند (گوانگ‌منگ[1]، ۲۰۲۲). یافته‌های این پژوهش از نظر شکل تشکیل ابر، فاصله تا رومرکز و حتی ارتفاع ابر زلزله، بسیار شبیه به پژوهش اخیر در ایتالیا است که نشان از شباهت رفتاری سیستم گسلی رشته‌کوه زاگرس ایران و رشته‌کوه آپنینی[2] ایتالیا در ایجاد ابرهای زلزله و تولید رخدادهای لرزه‌ای دارد.

۵- نتیجه‌گیری

انسان باستان، زلزله را جزو علم هواشناسی آورده و صدها سال است که پیش‌نشانگر ابر زلزله را می‌شناسد. این پیش‌نشانگر، بار دیگر در عصر ماهواره‌ها مطرح شد؛ ولی تا یک دههٔ پیش، محدودیت در تعداد ماهواره‌های هواشناسی، کم بودن توان تفکیک مکانی و زمانی تصاویر، در دسترس نبودن و ژئورفرنس نبودن آن‌ها، عمده‌ترین موانع در تشخیص ابر زلزله بود. امروز با وجود ماهوارهٔ متئوست–۸ بر فراز اقیانوس هند، همهٔ این موانع رفع شده است و هرگونه فعل‌وانفعال ابری در آسمان منطقه به‌طور رایگان و آنی قابل‌پیگیری است.

برای جستجوی ابر زلزلهٔ ۷٫۳ ازگلهٔ کرمانشاه به تاریخ ۱۳۹٦/۰۸/۲۱، تصاویر مادون‌قرمز در بازه‌ای دو ماهه دریافت و بررسی شد. شدیدترین مورد مشکوک به ابر زلزله، در ۱۳۹٦/۰۸/۰۹ یعنی ۱۲ روز قبل از زلزله مشاهده گردید. سپس منشأ زمینی رطوبت آن ابر و مرسوم نبودن آن بررسی شد. ابر زلزلهٔ ٥٫٤ سی‌سخت کهگیلویه و بویر احمد به تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ هم که ٦ روز پیش از آن زلزله تشکیل شده بود، نیز پیدا شد.

در بررسی پیش‌نشانگر ابر زلزله، نباید تنها به ابرها توجه داشت، بلکه گسل‌های منطقه را نیز باید شناخت و ابرها را در آن سیستم گسلی بررسی کرد. در صورت رؤیت ابر مشکوک، زمینی بودن منشأ و مرسوم نبودن آن ابر در آن منطقه را نیز باید آزمود تا دقت مدل افزایش یابد. انتظار پیش‌بینی زلزله با پیش‌نشانگر ابر زلزله

1 Guangmeng
2 Apennine Mountains

وجود ندارد؛ ولی می‌توان آن را شناخت و در نظر داشت و در کنار پایش دیگر پیش‌نشانگرها به پیش‌بینی نزدیک شد. در پایان، پژوهش‌های مشابه برای سایر زلزله‌های زاگرس و همچنین بررسی و شناخت بیشتر ابر زلزلهٔ ازگله پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

از پشتیبانی دانشگاه یزد در به انجام رسیدن پایان‌نامه مطالعه پیش‌نشانگرهای زلزله ۱۳۹٦ ازگله با کمک سنجش‌ازدور، که این پژوهش از یافته‌های جانبی آن بود، صمیمانه سپاسگزاری می‌گردد.

کتابنامه

- بیت‌اللهی، علی؛ بی‌تا. *جزوهٔ پیش‌نشانگرهای زلزله*. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- توکلی، شهاب؛ ۱۳۹۸. *زلزله‌شناسی*. دانشگاه پیام نور. صص ۱٤۹-۱٤٥.
- جهانی، فاطمه؛ آخوندزاده هنزایی، مهدی؛ ۱۳۹٦. مشاهدهٔ آنومالی در سری زمانی هواویزها قبل از وقوع زلزله‌های بزرگ با تصاویر مودیس. *علوم و مهندسی زلزله*، *٤*(۱)، ۱-۱۰.
http://www.bese.ir/article_240309.html
- حسینی، میرهادی؛ ۱۳۹٥. جغرافیای تاریخی زلزله در ایران: اسناد مهلرزه‌ای از ابتدا تا عصر صفوی. *جغرافیا*، *۱٤*(٤۹)، ٤۳۳-٤٥۳. https://mag.iga.ir/article_707186.html
- حیاتی، سلمان؛ غلامی، یونس؛ اسماعیلی، آسیه؛ رضوی‌نژاد، مرتضی؛ ۱۳۹٥. پیش‌بینی محل وقوع زلزلهٔ احتمالی در استان خراسان رضوی با استفاده از روش شبکهٔ عصبی مصنوعی. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، *٥*(٤)، ۱-۱۹.
https://doi.org/10.22067/geo.v5i4.47594
- شمشیری، منیره؛ آخوندزاده هنزایی، مهدی؛ ۱۳۹٥. تشخیص آنومالی‌های TEC قبل از وقوع زلزله‌های بزرگ با استفاده از شبکهٔ عصبی مصنوعی. *علوم و فنون نقشه‌برداری*، *٥*(٤)، ٤۹-٥۸.
http://jgst.issgeac.ir/article-1-309-fa.html
- شهبازی، سمیه؛ پاپ‌زن، عبدالحمید؛ غلامی، مصیب؛ ۱٤۰۰. بررسی علل عدم تاب‌آوری جوامع محلی در مقابله با بلایای طبیعی: موردمطالعه زلزلهٔ استان کرمانشاه. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، *۱۰*(۳)، ۱٦۳-۱۷۹.
https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68474.1014
- صابر ماهانی، سینا؛ سپهوند، محمدرضا؛ ۱۳۹٦. بررسی پیش‌نشانگرهای ابر زلزله و تغییرات دمایی در شناسایی گسل مسبب زمین‌لرزه: مطالعهٔ موردی زلزلهٔ محمدآباد ریگان ۷ بهمن ۱۳۸۹. *اطلاعات جغرافیایی*، ۲٦(۱۰۱)، ۲٥-۳۲.
https://doi.org/10.22131/sepehr.2017.25723
- علوی‌پناه، سید کاظم؛ قربانی، محمدصدیق؛ ۱۳۸٦. نقش سنجش‌ازدور و بررسی‌های میدانی در تجزیه‌وتحلیل‌های مورفوتکتونیکی: مطالعهٔ موردی زلزلهٔ بم. *پژوهش‌های جغرافیایی*، *۳۹*(٦۰)، ۱٥-۲۹.
https://jrg.ut.ac.ir/article_18896.html
- علی‌زاده، امین؛ کمالی، غلامعلی؛ موسوی، فرهاد؛ موسوی بایگی، محمد؛ ۱۳۹۱. *هوا و اقلیم‌شناسی*. دانشگاه فردوسی مشهد. صص ۸۹-۸۸.

- مرکز لرزه‌نگاری کشور، موسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ ۱۳۹٤. *نقشه‌های لرزه‌خیزی استان‌های ایران ۱۹۰۰-۲۰۱۵*.
- مرکز لرزه‌نگاری کشور، موسسهٔ ژئوفیزیک دانشگاه تهران؛ ۱۳۹٦. *گزارش زمین‌لرزهٔ ۷٫۳ ریشتری ازگلهٔ کرمانشاه*.
- منصوری دانشور، محمدرضا؛ برهمند، علی‌اصغر؛ منصوری دانشور، پرویز؛ ۱۳۹۱. ارزیابی مدل ابر زلزله با برآورد نرخ همبستگی میان رویدادهای زلزله و پیش‌بینی آن‌ها در ایران برای سه ماههٔ چهارم ۲۰۰۹. *مخاطرات محیط طبیعی*، *۱*(۱)، ۱۱۱-۱۲٦. https://doi.org/10.22111/jneh.2012.2444
- نادری، فتح‌الله؛ فتوحی، صمد؛ نگارش، حسین؛ خلیلی، مرضیه؛ ۱٤۰۰. پهنه‌بندی ناپایداری‌های ژئومورفولوژیکی ناشی از زلزلهٔ ازگله ۲۱ آبان ۱۳۹٦، Mw=7.3 در استان‌های ایلام و کرمانشاه با مدل ویکور. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، *۱۰*(۲)، ۲۱-٤۱. https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68682.1016

- Al Banna, H., Abu Taher, K., Kaiser, S., Mahmud, M., Rahman, S., Hosen, S., & Cho, G. H., 2020. Application of artificial intelligence in predicting earthquakes: State-of-the-art and future challenges. *IEEE Access*, *8*, 192880–192923. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029859.
- Bolton, D., 1980. The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, *108*(7), 1046–1053. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2.
- Enomoto, Y., 2002. A tornado-type cloud observed on January 9, 1995 prior to the Kobe earthquake. In *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling* (pp. 267–273. TERRAPUB.
- Freund, F., 2013. Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space. *Acta Geophysica*, *61*(4), 775–807. https://doi.org/10.2478/s11600-013-0130-4.
- Guangmeng, G., 2021. A retrospective analysis about the Italy Emilia M6.0 earthquake prediction. *Open Journal of Earthquake Research*, *10*, 68–74. https://doi.org/10.4236/ojer.2021.102005.
- Guangmeng, G., 2022. On the relation between anomalous clouds and earthquakes in Italian land. *Frontiers in Earth Science*, *10*, 1–7. https://doi.org/10.3389/feart.2022.812540.
- Guangmeng, G., & Jie, Y., 2013. Three attempts of earthquake prediction with satellite cloud images. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *13*(1), 91–95. https://doi.org/10.5194/nhess-13-91-2013.
- Guo, G., & Wang, B., 2008. Cloud anomaly before Iran earthquake. *International Journal of Remote Sensing*, *29*(7), 1921–1928. https://doi.org/10.1080/01431160701373762.
- Guo, G., & Xie, G., 2007. Earthquake cloud over Japan detected by satellite. *International Journal of Remote Sensing*, *28*(23), 5375–5376. https://doi.org/10.1080/01431160500353890.
- Harrington, D., & Shou, Z., 2005. Bam earthquake prediction & space technology. In *Seminars of the United Nations Programme on Space Applications: Selected Papers from Activities Held in 2004* (Vol. 16, pp. 39–63). United Nations.
- Harrison, R. G., Aplin, K. L., & Rycroft, M. J., 2014. Brief Communication: Earthquake-cloud coupling through the global atmospheric electric circuit. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *14*(4), 773–777. https://doi.org/10.5194/nhess-14-773-2014.
- Jing, F., Zhong, C., Liang, Y., Jing, G., & Dong, W., 2015. Research on earthquake prediction from infrared cloud images. In *MIPPR 2015: Remote Sensing Image Processing,*

Geographic Information Systems, and Other Applications (pp. 1–6). International Society for Optics and Photonics. https://doi.org/10.1117/12.2203657.
- Kuang, J., Ge, L., Metternicht, G. I., Ng, A. H., Wang, H., Zare, M., & Kamranzad, F., 2019. Coseismic deformation and source model of the 12 November 2017 M_W 7.3 Kermanshah Earthquake (Iran-Iraq border) investigated through DInSAR measurements. *International Journal of Remote Sensing*, *40*(2), 532–554. https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1514542.
- Li-Xin, W., Jin-Ping, L., & Shan-Jun, L., 2009. Space observed two abnormal linear clouds before Wenchuan earthquake. In *Recent Advances in Geology and Seismology: Proceedings of the 3rd IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'09)* (pp. 138–143). WSEAS Press.
- Li, D. J., 1982. *Earthquake Clouds (in Chinese)*. Xue Lin Public Store.
- Mansouri Daneshvar, M., Tavousi, T., & Khosravi, M., 2014. Synoptic detection of the short-term atmospheric precursors prior to a major earthquake in the Middle East, North Saravan M 7.8 earthquake, SE Iran. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *7*(1), 29–39. https://doi.org/10.1007/s11869-013-0214-y.
- Martinelli, G., 2000. Contributions to a history of earthquake prediction research. *Seismological Research Letters*, *71*(5), 583–588**.** https://doi.org/10.1785/gssrl.71.5.583.
- Morozova, L. I., 1997. Dynamics of cloudy anomalies above fracture regions during natural and anthropogenically caused seismic activities. *Fizika Zemli*, *9*, 94–96.
- Ondoh, T., 2003. Anomalous sporadic-E layers observed before M 7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake; Terrestrial gas emanation model. *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*, *17*, 96–108.
- Pulinets, S. A., Morozova, L. I., & Yudin, I. A., 2014. Synchronization of atmospheric indicators at the last stage of earthquake preparation cycle. *Research in Geophysics*, *4*(1), 45–50. https://doi.org/10.4081/rg.2014.4898.
- Shou, Z., 2006. Earthquake vapor, a reliable precursor. In *Earthquake Prediction* (pp. 21–51). Taylor & Francis Group, LLC.
- Shou, Z., Xia, J., & Shou, W., 2010. Using the earthquake vapour theory to explain the French airbus crash. *Remote Sensing Letters*, *1*(2), 85–94. https://doi.org/10.1080/01431160903469061.
- Thomas, J. N., Masci, F., & Love, J. J., 2015. On a report that the 2012 M 6.0 earthquake in Italy was predicted after seeing an unusual cloud formation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *15*(5), 1061–1068. https://doi.org/10.5194/nhess-15-1061-2015.
- Tronin, A. A., 2010. Satellite remote sensing in seismology; A review. *Remote Sensing*, *2*(1), 124–150. https://doi.org/10.3390/rs2010124.
- Tronin, A. A., Hayakawa, M., & Molchanov, O. A., 2002. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China. *Journal of Geodynamics*, *33*(4–5), 519–534. https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00013-3.